

# 磁気ノズル加速におけるエネルギー輸送の数値解析 Numerical Investigation of Energy Transportation in Magnetic Nozzle Acceleration

江本一磨<sup>1</sup>、高橋和貴<sup>2</sup>、鷹尾祥典<sup>1</sup>

Kazuma Emoto<sup>1</sup>, Kazunori Takahashi<sup>2</sup>, Yoshinori Takao<sup>1</sup>

横浜国立大学<sup>1</sup>、東北大学<sup>2</sup>

Yokohama National University<sup>1</sup>, Tohoku University<sup>2</sup>

## 1 背景

プラズマを磁気ノズルで加速することで推力を得る宇宙推進機の研究開発が活発に行われている。主に高周波でプラズマを生成し、静磁石やソレノイドコイルが作るノズル構造の磁力線でプラズマを軸方向に輸送する。電極を用いずにプラズマを加速できることから宇宙推進機の長寿命化が期待でき、整備の困難な宇宙運用においては大きな利点となっている。

これまでに磁気ノズルを用いた宇宙推進機の性能向上に向けた開発が数多く行われてきた。近年では rf 電力 6 kW に対し、電力の利用効率を示す推進効率は約 20% に到達している [1]。しかし、電極を持つ従来型の宇宙推進機と比べると推進効率は低く、さらなる性能改善が求められる。磁気ノズル加速は電極を持たないことから、高周波電力のみがエネルギーの供給源となる。ゆえに推進効率の低さは、宇宙推進機内部におけるエネルギー損失に起因する。

理論と実験による考察から、磁気ノズルの磁場強度を上げることで誘電体側壁面へのエネルギー損失が低減し、結果的に推進効率が向上することが明らかにされている [2, 3]。これは誘電体側壁面に損失していたプラズマのエネルギーが磁気ノズルによって下流へと輸送されたことを意味するが、その詳細は明らかになっていない。本研究では磁気ノズル加速を用いた宇宙推進機の運動論シミュレーションを行い、推進機内部におけるプラズマのエネルギー輸送を明らかにすることを目的とする。

## 2 計算モデル

Particle-in-Cell / Monte Carlo collisions 法を用いた磁気ノズル加速の 2 次元モデルを構築した。図 1 に計算モデルを示す。rf アンテナから高周波電力を供給し、プラズマを生成する。ソレノイドは磁気ノズルを作り、+x 軸方向にプラズマを輸送する。なお、計算モデルは xy 軸に対して対称である。イオン・電子の

軌道と電磁場を計算し、収束した時の状態を得る。本計算モデルにおけるエネルギー損失は誘電体側壁面への損失  $P_w$ 、上部境界への損失  $P_t$ 、右部境界への損失  $P_r$ 、粒子間衝突による損失  $P_c$  である。磁場強度をパラメータとし、各境界面に損失するエネルギーフラックス分布を得た。

## 3 計算結果・考察

磁場を強化するとともに誘電体側壁面への損失  $P_w$  は抑制され、プラズマビームのエネルギーである  $P_r$  が増加する結果を得た。この結果は実験結果とも定性的に一致し、実験をおおむね再現できていると言える。また、上側に発散するように輸送されていたプラズマのエネルギーが内側に移動し、x 軸に近い領域で輸送されることが分かった。弱磁場では rf アンテナ近傍で加熱された高エネルギー電子が磁力線に沿って上側境界に輸送される一方、強磁場の場合は磁力線を横切って x 軸上までプラズマのエネルギーが輸送されていると考えられる。磁力線を横切ったエネルギー輸送についてさらなる解析が必要である。

## References

- [1] K. Takahashi, *Sci. Rep.* **11**, 2768 (2021).
- [2] T. Lafleur, *Phys. Plasmas* **21**, 043507 (2014).
- [3] K. Takahashi, T. Sugawara, and A. Ando, *Sci. Rep.* **10**, 1061 (2020).

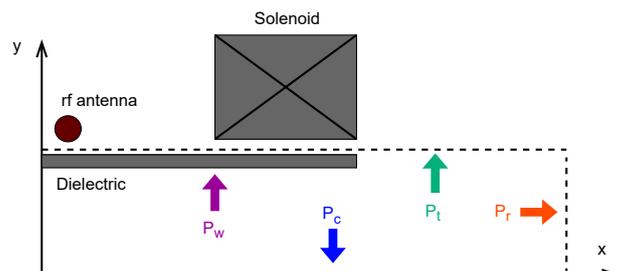


図 1 計算モデル